



DECKBLATT

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
		N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N N	X A A X X	A A	N N N N
EU 201	9K			HG	RB	0041	00

Titel der Unterlage: Gültigkeitsbereiche des Darcy-Gesetzes für poröse und klüftige Gesteine im Hinblick auf Durchsatz von Wasser und Wasserinhaltsstoffen (Archiv-Nr.: 103.560)	Seite:
	I.
	Stand:
	Juli 1988

Ersteller: BGR	Textnummer:
--------------------------	-------------

Stempelfeld:

PSP-Element TP...9K/2122423	zu Plan-Kapitel: 3.1.10.4
-----------------------------	---------------------------

	PL	PL

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung der PTB.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE

HANNOVER

Gültigkeitsbereiche des Darcy-Gesetzes für poröse
und klüftige Gesteine im Hinblick auf Durchsatz
von Wasser und Wasserinhaltsstoffen

1. Sachbearbeiter: [REDACTED]
2. Auftraggeber: Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe
3. Datum: Juli 1988
4. Archiv-Nr.: 103.560
5. Tagebuch-Nr.: 11.541/88

Inhalt	Seite
1. Anlaß	2
2. Zusammenfassung	3
3. Gültigkeitsbereiche des Darcy-Gesetzes für poröse Gesteine	4
4. Gültigkeitsbereiche des Darcy-Gesetzes in Kluftwasserleitern	7
5. Zum Stofftransport in Kluftwasserleitern	10
6. Literatur	16

1. Anlaß

Im Rahmen der

Hydrogeologischen Begutachtung der Antragsunterlagen
im Hinblick auf die sicherheitstechnische Realisier-
barkeit für ein Endlager für radioaktive Abfälle in
der Schachtanlage Konrad/Salzgitter

hat der Niedersächsische Umweltminister (NMU) Nachforderungen
zur Hydrogeologie gestellt (NLfB, Archiv - Nr. 101 833, Tgb. -
Nr. 7151/87).

Die Nachforderung HY 27 "Gültigkeit des Darcy - Gesetzes"
wurde in der abgestimmten Protokollnotiz vom 09. 03. 1988
umformuliert in:

"BGR und NLfB stimmen überein, daß das DARCY-Gesetz
grundsätzlich auch für Kluftgrundwasserleiter inner-
halb eines repräsentativen Elementarvolumens gültig
ist (siehe z.B. [REDACTED] (1979): Groundwater).

Im Rahmen der Nachforderung HY 27 wird BGR schriftlich
herleiten, daß die Voraussetzungen für die Anwendung
des DARCY-Gesetzes auf den Kluftwasserleiter des Modell-
raumes KONRAD gegeben sind."

Die Beantwortung erfordert die Bearbeitung in drei Schritten:

- a) Eine theoretische Betrachtung über die Anwendung des DARCY-
Gesetzes und das zugrundeliegende repräsentative Elementar-
volumen (REV) im Hinblick auf die generelle Situation bzgl.
des feinklüftigen Gebirges im Bereich KONRAD,
- b) eine Grundlage über das Kluftinventar im Modellraum KONRAD,

c) eine Synthese aus a), für die die Ausarbeitung hier vorgelegt wird und b), die von der Geologie zusammengestellt werden muß.
Anmerkung: Absatz 2 von HY 27 (NLfB, Archiv - Nr. 101 833) wird bei HY 35 bearbeitet.

2. Zusammenfassung

Für den Wasserdurchsatz durch Sedimente gilt das Kontinuumskonzept und das Darcy-Gesetz. Insgesamt spricht beim gegenwärtigen Stand der wissenschaftlichen Diskussion nichts gegen die bevorzugte Anwendung des Darcy-Gesetzes für bindige Sedimente auch im Bereich kleiner hydraulischer Gradienten.

Auch für Kluftwasserleiter ist das Kontinuumskonzept gerechtfertigt, sofern das Kluftsystem nur hinreichend vernetzt ist. Zur Überprüfung dieser Bedingung ist jedoch eine repräsentative Statistik des Kluftinventars im gesamten Modellgebiet Voraussetzung, wobei die Extrapolation des Kluftinventars ins Unverritzte vom geologischen Standpunkt vertretbar sei muß.

Für den Fall, daß ein Feinkluftsystem existiert, ist noch zwischen dem Durchsatz von Wasser und dem Durchsatz von Wasserinhaltsstoffen zu unterscheiden. Für die Abstandsgeschwindigkeit des Wassers ist die Porosität des Kluftsystems maßgeblich. Aufgrund der Matrixdiffusion ist unter bestimmten Voraussetzungen für die Abstandsgeschwindigkeit der Konzentrationsfront jedoch die Gesamtporosität von Kluftsystem und umgebender Matrix heranzuziehen.

3. Gültigkeitsbereiche des Darcy-Gesetzes für poröse Gesteine

Die Beantwortung der Frage, unter welchen Umständen der Wassertransport durch Gesteine dem Darcy-Gesetz folgt, gehört spätestens seit den Abhandlungen durch [REDACTED] (1979) zu den Grundlagen der Geohydraulik.

Man denke sich aus einem körnigen, porösen und bindigen Gestein ein kubisches Volumen herausgeschnitten. Auf zwei gegenüberliegende offene Flächen des Kubus wirken unterschiedliche hydraulische Drücke h . Die übrigen vier Flächen seien versiegelt. Man findet: Der Quotient aus durchströmender Menge q pro Flächeneinheit und dem Druckgradienten $\text{grad } h$ ist eine gesteinspezifische Größe. Sie wird als Durchlässigkeit k bezeichnet:

$$q = -k \text{ grad } h.$$

Messungen an porösen, bindigen Gesteinsproben im Labor bestätigen diese Proportionalität, die DARCY als erster erkannte. Auch aus Messungen im Feld ist die Proportionalität indirekt ableitbar: Zum Beispiel folgt die Absenkung des Wasserspiegels um einen Grundwasserförderbrunnen Gesetzmäßigkeiten auf der Grundlage der Darcy-Beziehung.

Mit einem solchen, in der Physik sehr oft benutzten Kontinuums-konzept gelingt die einfache Beschreibung makroskopisch beobachtbarer Phänomene, obwohl der Mikrokosmos, in diesem Fall der Porenraum im Gestein, höchst kompliziert strukturiert ist.

Versuche, aus den Dimensionen und Anordnungen der Poren theoretisch die makroskopisch meßbare Durchlässigkeit herzuleiten, gelangen immer nur annähernd und mit großen Unsicherheiten: Es ist unmöglich, eine exakte Beziehung zwischen Porenstruktur und Durchlässigkeit herzustellen.

Jedoch macht ein Blick in den Mikrokosmos der Gesteine einigermaßen verständlich, warum makroskopisch Proportionalität in einem Handstück oder im Anstehenden gemessen wird: Das mikroskopische Strömungsnetz besteht aus kurzen Strömungsbahnen zwischen Verzweigungspunkten. Für jedes Teilstück gilt je nach Querschnittsform eine Art Hagen-Poiseuille'sches Gesetz, nämlich wiederum Proportionalität zwischen Durchsatzmenge und Druckgradient. Die serielle und parallele Schaltung solcher Strömungsbahnen führt notwendigerweise wiederum zur Proportionalität zwischen Durchsatz und Druckgradient im Großen.

Der Bereich des Darcy'schen Gesetzes ist nach drei Seiten hin eingeschränkt, oder es wird seine Gültigkeit in Frage gestellt:

Im Bereich kleiner hydraulischer Gradienten wird bereits seit fast hundert Jahren kontrovers diskutiert, ob dort ein strömungsloser Bereich oder auch ein nicht-linearer Anstieg der Filtergeschwindigkeit mit wachsendem Gradienten vorliegt. [REDACTED]

[REDACTED] (1987) haben hierzu umfangreiche Literaturrecherchen angestellt. Zitat aus ihrer Zusammenfassung: "Insgesamt spricht beim gegenwärtigen Stand der wissenschaftlichen Diskussion nichts gegen die bevorzugte Anwendung des Darcy-Gesetzes für bindige Sedimente auch im Bereich kleiner hydraulischer Gradienten."

Zu sehr großen hydraulischen Gradienten hin gilt die Proportionalität zwischen Gradient und Durchflußmenge nicht mehr. Die Strömung wird turbulent. Die Reynoldszahl Re definiert die Grenze zwischen laminarem und turbulentem Fluß:

$$Re = \frac{q d}{\nu}$$

q ist die pro Flächeneinheit durchgesetzte Menge,
 d ist ein durchschnittlicher Wert für gerade Porenabschnitte,
 ν ist die kinematische Viskosität des in den Poren strömenden
Mediums.

Auch bei extrem ungünstigen Verhältnissen bezüglich der Grundwasserströmung bleibt man fast immer im Bereich $Re < 1$ bis $Re < 10$ und damit bei laminarer Strömung. Turbulenter Fluß kann nur im Karst oder in Aquiferen sehr nahe an Brunnen oder Quellen vorkommen ([REDACTED] 1979).

Die Einschränkung des Darcy-Gesetzes zu einer dritten Seite hin betrifft die Frage, wie groß ein 'Repräsentatives Elementarvolumen' (REV) aus einem makroskopisch homogen wirkenden Gesteinsverband sein muß, um daran verlässlich Durchlässigkeitswerte bestimmen zu können. Mathematisch wird dieses Problem bei [REDACTED] (1979) behandelt. Das Ergebnis ist in Worten: Das REV muß so groß sein, daß das Hinzufügen oder Wegnehmen eines Bruchteils, welcher nur eine oder wenige Poren beinhaltet, keinen signifikanten Einfluß auf die am REV makroskopisch meßbaren physikalischen Eigenschaften hat. Unterhalb einer bestimmten Größe des Elementarvolumens wird man jedoch große Änderungen der physikalischen Größen feststellen, nämlich dann, wenn sich das Handstück in seinen äußeren Dimensionen den charakteristischen Abmessungen des Porenraumes nähert. Abb. 1 oben macht deutlich, was gemeint ist. Ein REV ist nur für den mittleren Bereich des betrachteten Gesteinsvolumens definiert. Wählt man das Kontrollvolumen zunehmend größer (rechts in Abb. 1 oben), so kann sich ebenfalls eine Abweichung vom geradlinigen Kurvenverlauf bemerkbar machen. Diese ist auf Heterogenitäten größeren Ausmaßes wie etwa den Wechsel der geologischen Schichten zurückzuführen.

4. Gültigkeitsbereiche des Darcy-Gesetzes in Kluftwasserleitern

Die Frage nach der Gültigkeit des Darcy'schen Gesetzes in Kluftwasserleitern hängt ebenfalls eng mit der Existenz eines REV zusammen. Je nach Feinheit des Kluftsystems beginnt das REV jedoch erst bei größeren Volumina - vergl. Abb. 1 unten.

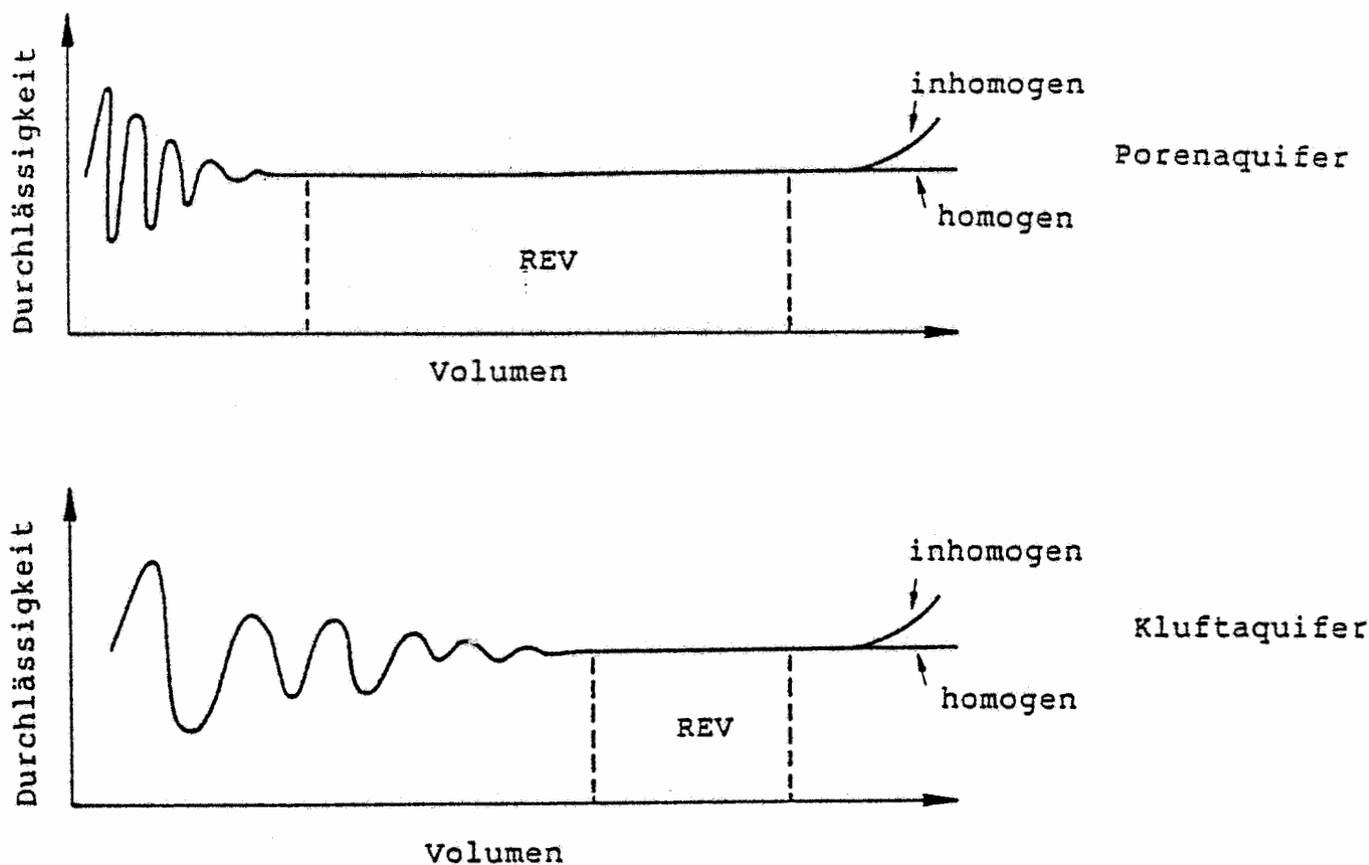


Abb. 1: Vergleich des REV von Porenaquifer und Kluftaquifer.

Der Kontinuumsansatz für Kluftwasserleiter wurde von [REDACTED] et al. (1982,1983) intensiv diskutiert mit überzeugendem Resultat. Gegeben sei die statistische Beschreibung eines Kluftwasserleiters, bestehend aus Klufthäufigkeit, Kluftweite und Kluftorientierung. Aus synthetischen Realisierungen solcher Kluftsysteme wurden unterschiedlich große Kontrollvolumina abgegrenzt und zur richtungsabhängigen Durchlässigkeitsberechnung herangezogen. Ein typisches Ergebnis dieser Studie ist in Abb. 2 dargestellt, die mit zunehmender Größe des Kontrollvolumens die Entstehung der Durchlässigkeitsellipse zeigt, wobei die Wurzel aus der errechneten Durchlässigkeit reziprok aufgetragen ist.

[REDACTED] et al. kommen zu folgendem Schluß:

Sind im Kontrollvolumen hinreichend viele Klüfte vorhanden oder ist das Kontrollvolumen hinreichend groß, so existiert für das Kluftsystem ein REV. Die berechnete Durchlässigkeit des Kluftsystems ist richtungsabhängig und erscheint im Polardiagramm näherungsweise als Ellipse oder Kreis, und es gilt das Darcy'sche Gesetz für das Kluftsystem.

Es kann auch sein, daß überhaupt kein REV existiert. Dieser Fall tritt ein, wenn die Klüftung so inhomogen und grob ist, daß sie nicht mehr als mikroskopisch aufgefaßt werden darf, sondern die gleichen Dimensionen wie die makroskopischen Strukturen erreicht. Dann ist es nicht mehr möglich, das Kontinuumskonzept anzuwenden. Der Bereich des REV in Abb. 1 unten schrumpft auf Null zusammen. In Modellen zum Wasser- und Stofftransport müssen dann die realen Strukturen berücksichtigt werden.

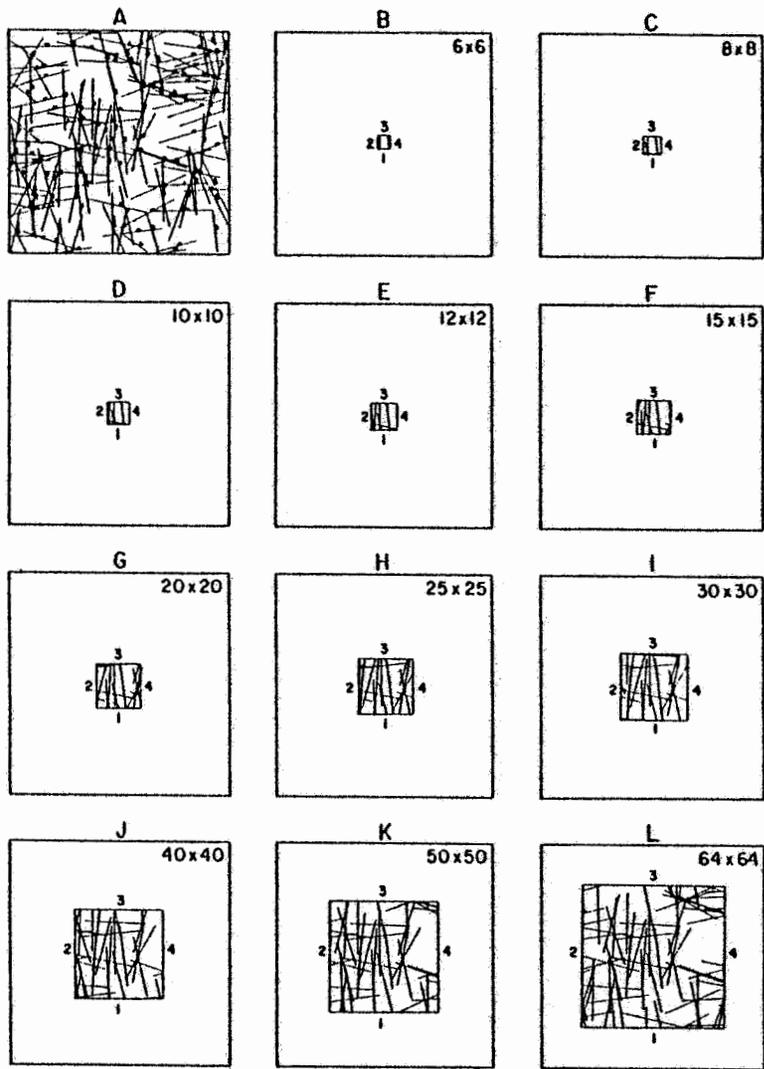


Abb. 2a: Kontrollvolumina zunehmender Größe. Bemaßung in inch.

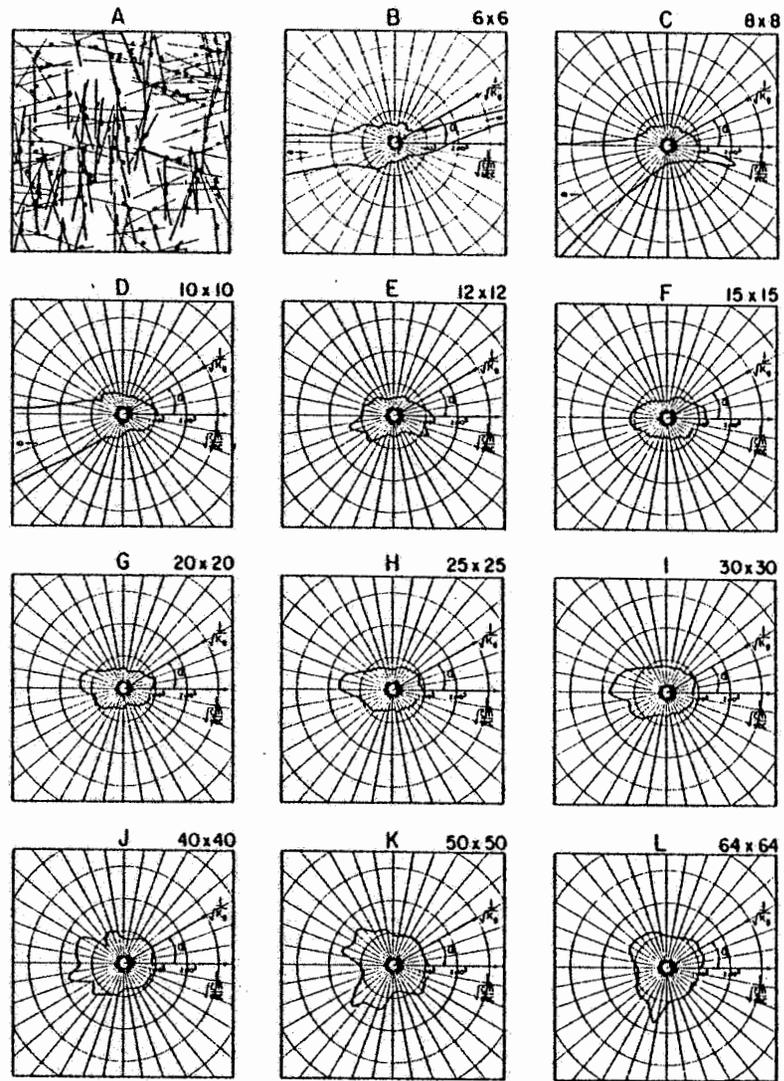


Abb. 2b: Durchlässigkeitsellipsen für die Kontrollvolumina der Abb. 2a

5. Zum Stofftransport in Kluftwasserleitern

Geht man davon aus, daß ein Feinkluftsystem existiert und ein REV definiert werden kann, so ist im Gegensatz zum Porenwasserleiter bei einem Kluftwasserleiter noch folgendes zu berücksichtigen: Bei einem Porenwasserleiter existiert nur ein Typ von Transportwegen; das sind die Poren. Bei einem Kluftwasserleiter sind jedoch zwei Typen von Transportwegen vorhanden. Außer dem konvektiven Wassertransport migrieren die Inhaltsstoffe noch in die poröse Matrix hinein. Dabei setzt man im allgemeinen voraus, daß diese Migration nur molekulare Diffusion betrifft.

Zur Erläuterung des letztgenannten Sachverhaltes sei ein Parallelkluftsystem betrachtet. Abb. 3 zeigt von seinen parallelen Kluftebenen eine Kluftebene senkrecht zur Bildebene mit der halben Dicke der Matrix, welche eine Kluft von der nächsten trennt. Einem Trägerfluid, das mit konstanter Geschwindigkeit die Kluft durchfließt, wird zur Zeit $t = 0$ eine Stofffracht mit konstanter Konzentration aufgeprägt.

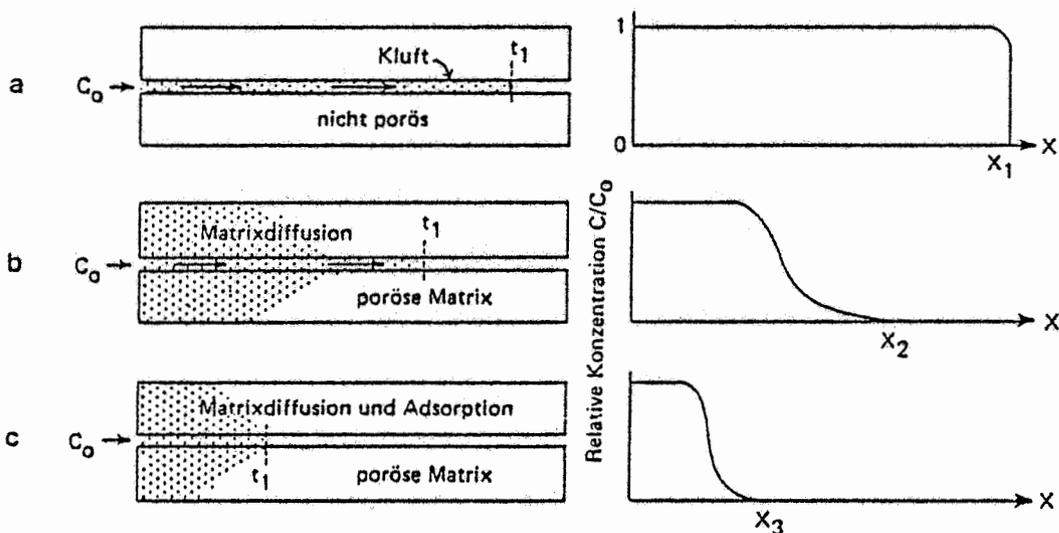


Abb. 3: Einfluß der Matrixdiffusion auf Konzentrationsprofile

- Konvektiver Transport in der Kluft bei nicht poröser Matrix
- Konvektiver Transport in der Kluft mit Matrixdiffusion
- Konvektiver Transport in der Kluft mit Matrixdiffusion und Adsorption

Ist die Matrix nicht porös, ergibt sich die in Abb. 3a dargestellte Situation. Zum Beobachtungszeitpunkt t_1 herrscht hinter der Kontaminationsfront über die gesamte Kluftlänge hin die Eingangskonzentration. Von Diffusion und mechanischer Dispersion in der Kluft wurde hier abgesehen. Deswegen hat das Konzentrationsprofil Rechteckgestalt. Die Front hat die Position x_1 erreicht.

Abb. 3b zeigt die Situation unter Berücksichtigung einer porösen Matrix. In diesem Fall entsteht ein Konzentrationsgefälle zwischen dem Fluid im Kluftsystem und dem Fluid in der benachbarten Matrix. Daher findet molekulare Diffusion aus dem Kluftsystem in die poröse Matrix statt. Dadurch wird Inhaltsstoff dem konvektiven Transport in Kluftsystem entzogen, was eine Ausdünnung des Konzentrationsprofiles und eine verzögerte Laufzeit der Konzentrationsfront zur Folge hat. Die Konzentrationsfront hat zum Beobachtungszeitpunkt t_1 die im Vergleich zu x_1 kürzere Strecke x_2 durchlaufen.

Läßt man zusätzlich noch in der Matrix und an den Kluftflächen Adsorption zu, verstärken sich Ausdünnung und Laufzeitverzögerung (Abb. 3c).

Anhand der Modellvorstellung eines solchen Parallelkluftsystems läßt sich die Ausbreitung von Konzentrationsfronten konservativer, d. h. nicht zerfallender, nicht sorbierbarer Inhaltsstoffe in Kluftsystemen theoretisch untersuchen ([REDACTED] 1988). Abb. 4 zeigt beispielhaft die zeitliche Entwicklung eines Konzentrationsprofiles. Als Ergebnis ist festzuhalten, daß die Abstandsgeschwindigkeit der Konzentrationsfront deutlich kleiner als die Abstandsgeschwindigkeit des Trägerfluids ausfällt.

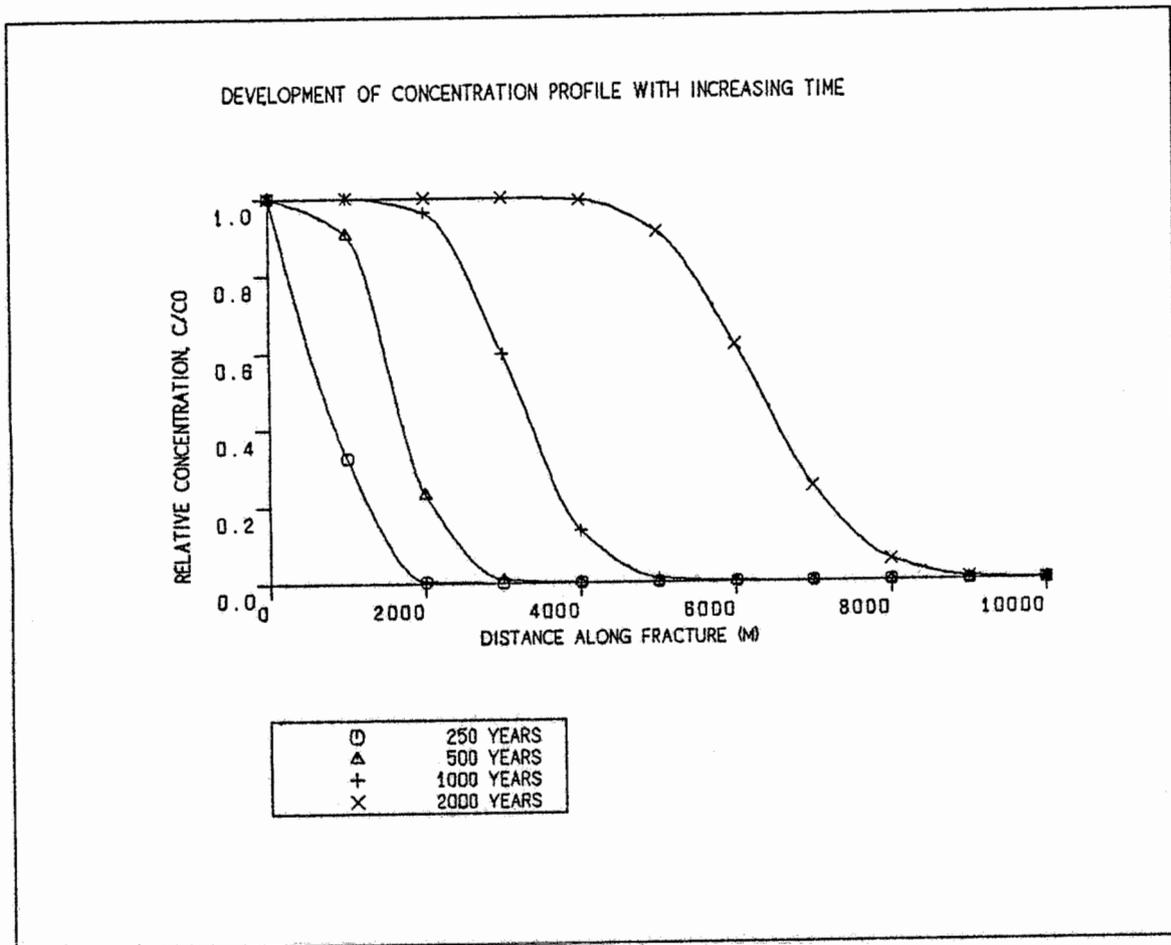


Abb. 4: Konzentrationsprofile im Parallelkluftsystem zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Es ergeben sich zwei Beziehungen, die eine formale Ähnlichkeit zwischen Poren- und Kluftwasserleiter aufzeigen.

$$\text{Abstandsgeschw. Trägerfluid} = \frac{\text{Filtergeschw.}}{\text{Porosität des Kluftsystems}}$$

$$\text{Abstandsgeschw. Konz.-Front} = \frac{\text{Filtergeschw.}}{\text{Porosität von Kluftsystem und Matrix}}$$

Die zweite dieser Beziehungen gilt unter der Voraussetzung, daß der Kluftabstand genügend klein und die Durchlaufzeit genügend lang ist, sodaß die poröse Matrix hinter der Front durch Matrixdiffusion gesättigt ist.

Die Bedeutung dieser beiden Beziehungen sei durch das folgende Zahlenbeispiel erläutert. Legt man

als Porosität des Kluftsystems 0,001

und als Porosität der Matrix 0,01

zugrunde, so ergibt sich

Abstandsgeschw. Trägerfluid = Filtergeschw. * 1000

Abstandsgeschw. Konz.-Front = Filtergeschw. * 91.

Daraus wird ersichtlich, daß in diesem Zahlenbeispiel die Konzentrationsfront etwa 11-fach langsamer läuft als das Trägerfluid. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 5 maßstabsgerecht dargestellt: Zum Beobachtungszeitpunkt hat die Konzentrationsfront nur ein Elftel des Weges des Trägerfluids durchlaufen. Bei kleinerer Porosität des Kluftsystems und/oder größerer Porosität der Matrix verschieben sich die Verhältnisse zu noch geringerer Abstandsgeschwindigkeit der Konzentrationsfront.

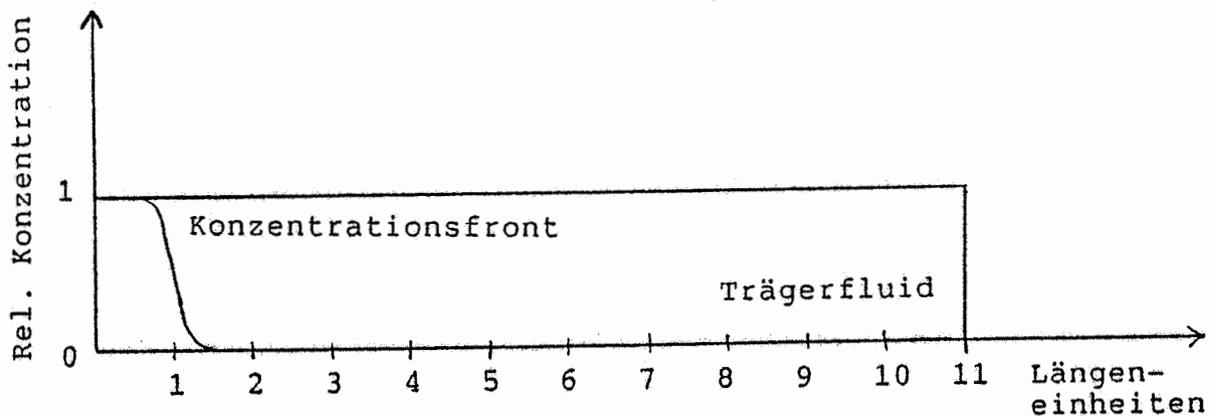


Abb. 5: Position von Trägerfluid und Konzentrationsfront zum gleichen Beobachtungszeitpunkt

In diesem Zusammenhang wird zudem deutlich, daß die Frage nach der Übertragbarkeit der Dispersion, wie sie das Kontinuumskonzept für Porenwasserleiter vorsieht, nur einen Effekt von geringer Größenordnung betrifft. Die Abstandsgeschwindigkeit der Konzentrationsfront und damit ihre jeweils aktuelle Position wird signifikant durch die Porositäten von Kluftsystem und Matrix gegeben. Die

Unsicherheit, mit der diese beiden Porositäten praktisch bestimmt werden können, und die daraus resultierende Unsicherheit der jeweils aktuellen Frontposition ist deutlich größer als die in den Beispielen der Abb. 4 zu beobachtende Aufweitung der Konzentrationsfront.

Diese Betrachtungen gelten zunächst nur für das Parallelkluftsystem. Sie gelten aber auch für kompliziertere Kluftstrukturen, dann nämlich, wenn der charakteristische Kluftabstand eines vernetzten Kluftsystems nicht größer ist als der Kluftabstand im Parallelkluftsystem. Die Modellvorstellung des Parallelkluftsystems ist mit Hinblick auf den Stofftransport in einem vernetzten Kluftsystem mit gleichem charakteristischen Kluftabstand als konservativ zu werten. Im Gegensatz zu einem vernetzten Kluftsystem besitzt das Parallelkluftsystem

- in seinen parallelen Klüften die kürzesten Fließwege für das Trägerfluid
- und in der geometrischen Anordnung des Feststoffskelettes die kleinste Oberfläche, über die Diffusion in die Matrix wirksam werden kann.

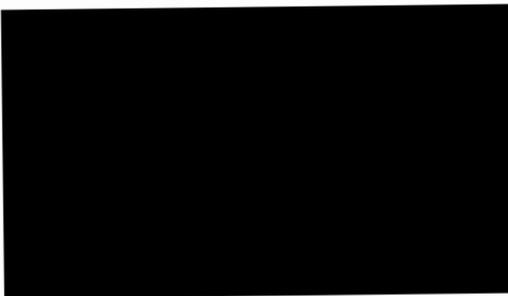
Die Modellvorstellung eines Parallelkluftsystems, bei der Diffusion in die Matrixporosität nicht unterstellt wird, führt bezüglich des Stofftransportes wiederum zu noch konservativeren Abschätzungen der Abstandsgeschwindigkeit der Konzentrationsfront, da diese dann durch die Abstandsgeschwindigkeit des Trägerfluids bestimmt ist.

Dazu ist anzumerken, daß sich die wissenschaftliche Forschung hinsichtlich der physikalischen Beschreibung des Stofftransportes in Kluftsystemen vor allem bezüglich komplexer Geometrien erst im Anfangsstadium befindet. Eine vollständige makroskopische Beschreibung ist noch nicht bekannt, und die Modellbildung beschränkt sich derzeit noch auf geometrisch einfache mikroskopische Strukturen.

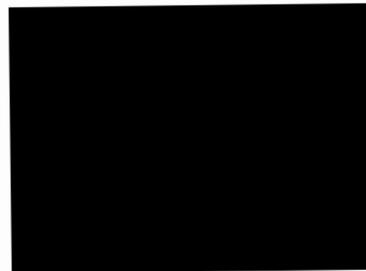
BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE

HANNOVER

Im Auftrage:



Sachbearbeiter:



6. Literatur

- BEAR, J. (1979): Hydraulics of Groundwater - McGraw-Hill
Book Company, New York
- CACAS, M. C., LEDOUX, E., DE MARSILY, G. & TILLIE., B. (1987):
The Use of Stochastic Concepts in Modeling Fracture Flow -
presented on the International Conference on Groundwater
Contamination: Use of Models in Decision-Making,
Amsterdam, October 26 - 29
- LONG, J. C. S., REMER, J. S., WILSON, C. R. & WITHERSPOON, P. A.
(1982): Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous
Fractures - Water Resourc. Research, 18, 3, 645 - 658
- LONG, J. C. S. (1983): Investigation of Equivalent Porous Medium
Permeability in Networks of Discontinuous Fractures - Ph. D.
Thesis, University of California, Berkeley
- SCHILDKNECHT, F. & SCHNEIDER, W. (1987): Über die Gültigkeit des
Darcy-Gesetzes in bindigen Sedimenten bei kleinen hydraulischen
Gradienten - Stand der wissenschaftlichen Diskussion
Geologisches Jahrbuch, C48, 3 - 21
- VOGEL, P. & GIESEL, W. (1988): Zur Ausbreitung von Wasserinhalts-
stoffen im Gebirge - Theoretische Betrachtungen zur Äquivalenz
von Parallelkluftsystem und homogenem Porenwasserleiter
Geologisches Jahrbuch, E42, 79 - 94